

10/091485  
Feb 18 2004



⑯ BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENTAMT

⑯ Offenlegungsschrift  
⑯ DE 43 20 408 A 1

⑯ Int. Cl. 5:  
B 23 K 26/04  
C 21 D 1/82  
B 44 D 3/16  
C 23 F 4/00  
// B21B 45/04

⑯ Aktenzeichen: P 43 20 408.2  
⑯ Anmeldetag: 21. 6. 93  
⑯ Offenlegungstag: 22. 12. 94

⑯ Anmelder:

Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der  
angewandten Forschung eV, 80636 München, DE

⑯ Vertreter:

Münich, W., Dipl.-Phys. Dr.rer.nat., Pat.-Anw., 80689  
München; Steinmann, O., Dr., Rechtsanw., 81677  
München

⑯ Erfinder:

Barkhausen, Winfried, Dipl.-Phys., JB, NL; Wehner,  
Martin, Dr.-Ing., 5100 Aachen, DE; Wissenbach,  
Konrad, Dr.rer.nat., 5100 Aachen, DE

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

⑯ Verfahren zur Prozeßkontrolle und -regelung bei der Oberflächenbearbeitung von Werkstücken mit gepulster Laserstrahlung

⑯ Beschrieben wird ein Verfahren zur Prozeßkontrolle und -regelung bei der Oberflächenbearbeitung von Werkstücken mit gepulster Laserstrahlung und bedarfsweise Prozeßgas.

Die Erfindung zeichnet sich dadurch aus, daß on-line die für die jeweilige Bearbeitung relevanten Laserstrahlparameter, die von der Bearbeitungsstelle reflektierte Strahlung der Bearbeitungs- und/oder eines Sondenlasers und/oder die vom Bearbeitungsplasma emittierte Strahlung gemessen werden und daß die Meßwerte in einer EDV-gestützten Steuereinheit durch Ist-Wert/Soll-Wert-Vergleich ausgewertet werden. Anhand dieser Auswertung erfolgt eine Regelung der zur Anpassung der Istwerte an die Sollwerte erforderlichen Laserstrahlparameter und/oder der Position des Werkstücks mittels eines geeigneten Handhabungssystems und/oder der Zufuhr von Prozeßgas unter Einsatz der Steuereinheit.

DE 43 20 408 A 1

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

BUNDESDRUCKEREI 10.94 408 051/341

11/33

DE 43 20 408 A 1

## Beschreibung

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Prozeßkontrolle und -regelung bei der Oberflächenbearbeitung von Werkstücken mit gepulster Laserstrahlung und bedarfswise Prozeßgas.

Die Oberflächenbehandlung mit gepulster Laserstrahlung umfaßt verschiedene Verfahren zur Modifizierung von Schichten im Bereich der Oberfläche von Werkstücken, insbesondere von dünnen Schichten mit Dicken  $d \leq 100 \mu\text{m}$ , wie z. B. Abtragen, Reinigen, Aufschmelzen, Glätten, Polieren, Versiegeln, Legieren, Verändern der Gefügestruktur.

Bei einer derartigen Oberflächenbearbeitung von Werkstücken mit gepulster Laserstrahlung erfolgt die Bearbeitung mit einer Folge von Laserpulsen, im allgemeinen mehr als einem Laserpuls. Der Einkopplungsgrad für die Laserenergie, der Absorptionsgrad, und damit die Wirkung der Laserstrahlung auf das Werkstück hängt wesentlich vom Ausgangszustand der Oberfläche ab und weist für technische Oberflächen je nach Anwendungsfall starke Schwankungen auf. Um eine hohe Bearbeitungsqualität sicherzustellen, müssen die bearbeitungsrelevanten Parameter wie z. B. Laserstrahlparameter, Parameter der Werkstückhandhabung und Prozeßgas an die jeweiligen Oberflächengegebenheiten angepaßt werden.

Anwendungsbeispiele für die Oberflächenbearbeitung von Werkstücken sind das Abtragen und Umschmelzen von Oberflächen zur Verschleißminderung, wie z. B. von Gußoberflächen von Zylinderlaufflächen und von Nockenwellen oder das Abtragen von Zunderschichten und Aufschmelzen der Metaloberfläche bei Edelstahlbauteilen zur Erhöhung der Korrosionsbeständigkeit.

Im Stand der Technik sind verschiedene Verfahren und Vorrichtungen geoffenbart, die sich auf die Oberflächenbehandlung von Werkstücken mit gepulster Laserstrahlung beziehen.

In der Druckschrift DE-OS 39 11 329 A1 ist ein Verfahren zur berührungslosen Entlackung von Lackschichten offenbart, bei dem optische Energie von einem gepulsten Laser zum Abtragen von Lackschichten verwendet wird.

Bei diesem Bearbeitungsvorgang entsteht ein Plasma, dessen Lichtemission zur Regelung der Entlackungstiefe insbesondere bei Mehrschichtsystemen ausgenutzt wird. Dabei wird die Lichtemission einer spektroskopischen Analyse unterworfen und der Laser wird abgeschaltet, wenn die gewünschte Entlackungstiefe erreicht ist. Eine Überwachung und Regelung der Laserstrahlparameter während der Bearbeitung erfolgt nicht.

In der Druckschrift DE-OS 36 00 591 A1 sind ein Verfahren und eine Vorrichtung geoffenbart, bei dem mit einem gepulsten Laser Verunreinigungen von der Oberfläche von Metallen entfernt werden sollen. Dabei werden die Verunreinigungen unter der Einwirkung der Laserpulse weggedampft und wenigstens ein Emissionspektrum der verdampften Verunreinigung aufgenommen. Sobald die für die Verunreinigungen spezifischen Spektrallinien nicht mehr im Spektrum vorhanden sind, wird der Laser abgeschaltet. Eine Regelung des Laser- systems während der Bearbeitung erfolgt in diesem Fall ebenfalls nicht.

In der Druckschrift DE-PS 39 43 523 C2 sind ein Verfahren und eine Vorrichtung zum Abtragen insbesondere metallischer Werkstücke mit Laserstrahlung geoffenbart, bei dem die Bearbeitungsstelle des Werkstücks mit

einem Strahlungsdetektor überwacht wird, mit dem die im Bereich der Bearbeitungsstelle herrschende Werkstücktemperatur durch Erfassen der Wärmestrahlung gemessen wird. Während der Bearbeitung erfolgt eine Regelung der Laserintensität dahingehend, daß die Temperatur auf der Werkstückoberfläche innerhalb vorgegebener Grenzen bleibt. Dabei wird die Regelung der Laserintensität durch An- und Abschalten des Lasers bei Erreichen der Temperaturgrenzwerte geregelt, so daß quasi gepulste Laserstrahlung mit fester Laserintensität vorliegt und die Pulsdauer durch Erreichen der Temperaturgrenzen gesteuert wird. Eine darüber hinausgehende Regelung der Laserstrahlparameter ist bei dieser Anwendung nicht notwendig.

Bei den beiden erstgenannten Verfahren wird die Laserstrahlbehandlung mit vorher festgelegten Laserstrahlparametern (Energiedichte, Strahlgeometrie, Pulsdauer, Pulswiederholungsrate) durchgeführt. Eine Regelung des Bearbeitungsprozesses ist auf das Abschalten des Lasers bei Erreichen eines bestimmten Endzustandes beschränkt. Dies ist für die dort geoffenbarten Anwendungsfälle in der Regel auch ausreichend. Jedoch können Bauteile, die einen inhomogenen Ausgangszustand der Bearbeitungsflächen oder komplizierte Geometrien wie Kanten, Nuten oder ähnliches aufweisen, auf diese Weise nicht zuverlässig bearbeitet werden. Im zweitgenannten Verfahren wird bei fester Laserintensität die Pulsdauer geregelt, um die Werkstücktemperaturen innerhalb gewisser Grenzen konstant zu halten. Bei Laserstrahlquellen mit fest vorgegebener Pulsdauer ist dieses Verfahren nicht einsetzbar.

Oberflächenbehandlungsverfahren mit gepulster Laserstrahlung können außer zum Abtragen gemäß dem zitierten Stand der Technik auch zum Aufschmelzen, Mikroglätten, Legieren und zur Veränderung der Gefügestruktur eingesetzt werden. Insbesondere komplizierte Werkstückgeometrien und inhomogene chemische und geometrische Oberflächenbeschaffenheit schränken hierbei die mit dem Stand der Technik erreichbaren Oberflächenqualitäten ein.

Demgegenüber liegt der Erfindung die Aufgabe zugrunde, die bekannten Verfahren dahingehend weiter zu entwickeln, daß durch Anpassung der bearbeitungsrelevanten Parameter an die sich lokal ändernde Oberflächengegebenheit die Bearbeitungsqualität gesteigert und eine reproduzierbare Bearbeitung mit gleichbleibender Bearbeitungsqualität gewährleistet werden kann.

Ferner sollen mit der Erfindung insbesondere Bauteile mit komplizierten Bauteilgeometrien oder mit inhomogener Oberflächenbeschaffenheit mit einem Laser definiert und reproduzierbar oberflächenbehandelt werden können. Weiterhin soll mit der vorliegenden Erfindung die Dauer der Bearbeitung eines Bauteils verkürzt werden, ohne daß hierdurch die Bearbeitungsqualität vermindert wird. Schließlich sollen mit der vorliegenden Erfindung die Einsatzmöglichkeiten der Oberflächenbehandlung mit gepulster Laserstrahlung erweitert werden.

Die Lösung dieser Aufgaben erfolgt durch die im Kennzeichen des Anspruchs 1 angegebenen Merkmale. Vorteilhafte Weiterbildungen der Erfindung sind mit den Merkmalen der Unteransprüche 2 bis 6 gekennzeichnet.

Von besonderer Bedeutung ist eine kontinuierliche Beurteilung des Bearbeitungszustandes während der Bearbeitung und die Anpassung der Prozeßparameter an die Bearbeitungsaufgabe in Abhängigkeit des aktuel-

len Bearbeitungszustandes. Das erfindungsgemäße Verfahren erfordert somit eine umfassende Kontrolle des Bearbeitungsprozesses und die Regelung der Bearbeitungsparameter. Dabei sind als Prozeßkenngrößen insbesondere die spektrale Intensität der Plasmaemission, der winkelabhängige Reflexionsgrad, der ortsaufgelöste Reflexionsgrad und der spektrale Reflexionsgrad von Bedeutung. Darüberhinaus hängt es von der jeweiligen Bearbeitungsaufgabe ab, ob diese Prozeßkenngrößen nur teilweise oder in beliebiger Kombination benötigt werden.

Die besondere Ausgestaltung des erfindungsgeinäßen Verfahrens nach Patentanspruch 5 ermöglicht eine besonders schnelle Anpassung der Prozeßparameter; damit verbunden ist eine Verkürzung der Bearbeitungsdauer. Die zusätzliche Verwendung eines Sondenlasers zur Durchführung der Reflexionsmessung gemäß Patentanspruch 6 führt zu einer besseren Charakterisierung der Oberflächenmorphologie und des Oberflächenzustandes des Werkstücks.

Die Erfindung wird anhand eines Ausführungsbeispiels und Zeichnungen erläutert.

Es zeigt

Fig. 1 schematische Darstellung der Prozeßregelung für die Oberflächenbearbeitung mit gepulster Laserstrahlung.

Fig. 2 Meßsystem für die On-Line-Messung von Pulsennergie und Spitzenintensität im Laserstrahl,

Fig. 3a Emissionsspektrum des Bearbeitungsplasmas beim Entzündern eines Edelstahlbauteils zu Beginn des Bearbeitungsprozesses,

Fig. 3b Emissionsspektrum des Bearbeitungsplasmas beim Entzündern eines Edelstahlbauteils zum Ende des Bearbeitungsprozesses,

Fig. 4 Änderung des spektralen Reflexionsgrades für unterschiedliche Pulszahlen beim Entzündern eines Edelstahlbauteils.

Fig. 1 zeigt in schematischer Darstellung das erfindungsgemäße Prinzip zur Prozeßkontrolle und -regelung für die Oberflächenbearbeitung von Werkstücken mit gepulster Laserstrahlung. Von einer Laserstrahlquelle 1 wird gepulste Laserstrahlung 2 auf das zu bearbeitende Werkstück 3 gerichtet, das auf einem Handhabungssystem 4 montiert ist, mit dem es während der Bearbeitung bezüglich der Laserstrahlung in geeigneter Weise verschoben werden kann. Mit einem Detektorsystem 5, bestehend aus geeigneten und an sich bekannten Detektoren, werden die Prozeßkenngrößen der Laserstrahlung und des Bearbeitungszustandes des Bauteils erfaßt und einer zentralen EDV-gestützten Steuereinheit 6 zugeführt. Grundvoraussetzung für eine definierte Oberflächenbehandlung mit Laserstrahlung ist die Kontrolle der Laserstrahlparameter während der Bearbeitung. Die charakteristischen Parameter der Laserstrahlung wie Wellenlänge, Pulsennergie, Strahlgeometrie, Energiedichte, Strahlverteilung, Pulsdauer, Pulsform und Pulswiederholungsrate haben entscheidenden Einfluß auf das Bearbeitungsergebnis.

Kritisch sind beispielsweise Schwankungen der Pulsennergie oder der Energiedichte während des Bearbeitungsprozesses, da bereits geringfügige Erhöhungen bzw. Verringerungen dieser Strahlparameter drastische Änderungen im Bearbeitungsergebnis nach sich ziehen können. Die Energiedichte kann auch örtlich über dem Strahlquerschnitt starke Schwankungen aufweisen.

Die Laserstrahlparameter werden On-Line gemessen. Hierzu wird ein geringer Teil des Laserstrahls ausgeteilt, z. B. durch Anordnung eines Strahlteilers zwi-

schen Laserstrahlquelle und Bearbeitungsoptik (siehe auch Fig. 2).

In den folgenden Figuren sind jeweils gleiche oder entsprechende Teile mit den selben Bezugszeichen bezeichnet, so daß auf eine erneute Vorstellung verzichtet wird, und lediglich die Abweichungen der in diesen Figuren dargestellten Ausführungsbeispiele gegenüber dem ersten Ausführungsbeispiel erläutert werden: Kontrolliert werden unter anderem die Pulsennergie der zeitliche Verlauf des Laserpulses (Pulsform) und die Verteilung der Energiedichte über den Strahlquerschnitt. Zur Messung der Pulsennergie und der Pulsform wird ein Teil der Laserstrahlung ausgeteilt und mit geeigneten Detektoren, wie beispielsweise Photodioden oder pyroelektrischen Detektoren gemessen. Die Strahlverteilung wird mit geeigneten optischen Elementen auf einen zweidimensionalen Detektor, z. B. eine CCD-Kamera, abgebildet. Die Verteilung der Energiedichte berechnet sich durch Skalierung mit der Pulsennergie.

Der Strahlengang für die Kontrolle der Laserstrahlparameter und die Analyse des Bearbeitungszustandes (Plasmaemissionsspektroskopie, Reflexion) sind vorteilhafter Weise so ausgelegt, daß die Bauteilhandhabung und die Fokussierung nicht eingeschränkt sind.

Fig. 2 zeigt beispielhaft ein Meßsystem zur On-Line-Erfassung der Strahlparameter Pulsennergie und Spitzenintensität. Ein erster Strahlteiler 7 blendet einen Teil der Laserstrahlung 2 aus; dieser abgetrennte Teil wird von einem zweiten Strahlteiler 8 wiederum in zwei geeignete Anteile aufgespalten. Der reflektierte Anteil wird über eine Linse 9 kollimiert und einer ersten Photodiode 10 zugeführt, deren Signal ein Maß für die Leistung der Laserstrahlung darstellt. Daraus ergibt sich nach zeitlicher Integration die gesamte Pulsennergie. Demgegenüber wird von dem durchgelassenen Anteil der Laserstrahlung mittels einer Lochblende 11 ein kleinerer Strahlbereich ausgeblendet und einer zweiten Photodiode 12 zugeführt, mit der das Intensitätsmaximum des jeweiligen Laserpulses gemessen wird. Die Lochblende 11 und die zweite Photodiode 12 sind gekoppelt und können über den Strahlquerschnitt verfahren werden, so daß je nach Modenverteilung die Spitzenintensität an beliebigen Stellen des gesamten Strahlquerschnitts erfaßt werden kann. Gleichzeitig kann auf diese Weise auch die Position der Spitzenintensität im Strahlquerschnitt ermittelt und bei der Auswertung der Meßwerte berücksichtigt werden. Die Meßwerte der beiden Photodioden liefern über eine Zwischenschaltung 13 Spannungswerte  $U(E)$  und  $U(I_{max})$ , die an die zentrale Steuereinheit 6 weitergeleitet werden.

Auch der Bearbeitungszustand wird On-Line während des Bearbeitungsprozesses analysiert. Hierzu werden die Plasmaemissionsspektroskopie (PES) sowie die winkelauflöste, ortsaufgelöste und spektrale Reflexionsmessung als Meßmethoden eingesetzt, und zwar einzeln oder kombiniert. Die optischen Signale der PES und der Reflexionsmessungen können mittels der Bearbeitungsoptik und/oder separater optischer Elemente zum zugehörigen Strahlungsempfänger des Detektorsystems 4 weitergeleitet werden. Die mit diesen Meßmethoden erfaßten Prozeßkenngrößen werden vom Detektorsystem 4 der zentralen Steuereinheit 6 zugeführt und dort mit den Strahlparametern korreliert, so daß zuverlässig eine Beurteilung des Bearbeitungsprozesses erfolgen kann. Alle Prozeßkenngrößen können zeitlich über einen Laserpuls gemittelt oder zeitaufgelöst innerhalb eines Laserpulses gemessen werden, je nach Pulslänge und Pulswiederholungsrate.

Die Plasmaemissionsspektroskopie wird eingesetzt, um die für den Bearbeitungsprozeß charakteristische Emission des Materialdampfplasmas bei der Bearbeitung mit Laserstrahlung auszuwerten und den Bearbeitungszustand hinsichtlich Elementzusammensetzung im verdampften Material, Anregungszustände der einzelnen Bestandteile und zeitliches Verhalten des Verdampfungsprozesses beurteilen zu können.

Fig. 3a und 3b zeigen beispielhaft Emissionsspektren des Bearbeitungsplasmas beim Entzünden eines Edelstahlbauteils, die mit einem Vielkanalspektrographen gemessen wurden. Im Einzelfall kann eine Auswertung ausgewählter Spektralbereiche für die Charakterisierung ausreichen, die durch Verwendung geeigneter Strahlungsdetektoren im allgemeinen mit vorgesetzten Filtern meßtechnisch realisiert wird.

Während in Fig. 3a das charakteristische Spektrum der Deckschicht dargestellt ist, zeigt Fig. 3b das sich hiervon unterscheidende Spektrum des Grundwerkstoffes. Durch Auswertung der Spektren kann der Bearbeitungsprozeß zu jedem Zeitpunkt analysiert werden, z. B. die Vollständigkeit des Abtrags oder eine Änderung des Einkoppelungsgrades für die Laserstrahlung. In Abhängigkeit des Meßergebnisses kann die zentrale Steuereinheit 6 z. B. das Handhabungssystem 4 ansteuern und/oder die Laserstrahlparameter nachregeln.

Die winkelaufgelöste Reflexionsmessung ermöglicht die Charakterisierung der Oberflächenmorphologie, die sich durch die Laserstrahlbehandlung während des Bearbeitungsprozesses ändern kann, z. B. Glättung oder Strukturierung. Diese geometrischen Veränderungen der Oberfläche sind abhängig von den Prozeßparametern und variieren im allgemeinen mit zunehmender Anzahl eingeschalteter Laserpulse, z. B. durch Schmelzen oder Verdampfen des Materials. Hierdurch ändert sich die Richtcharakteristik des vom Werkstück reflektierten Lichts. Zur Messung der winkelaufgelösten Reflexion wird entweder die an der Oberfläche reflektierte Laserstrahlung oder das reflektierte Licht eines Sondenlasers mit einem geeigneten optischen System auf eine Diodenzeile, CCD-Zeile oder einen oder mehrere positionsempfindliche Strahlungsdetektoren gelenkt. Die Meßwerte werden winkelabhängig ausgewertet.

Die spektrale Reflexionsmessung ermöglicht die Charakterisierung des Oberflächenzustandes, insbesondere die Belegung mit Deckschichten. So lassen sich je nach Bearbeitungsverfahren chemische Reaktionen bei der Bearbeitung (z. B. Oxidation), die Anreicherung der Oberfläche mit Legierungselementen, oder die Rekondensation von Materialdampf detektieren.

Fig. 4 zeigt beispielsweise die Änderung des spektralen Reflexionsgrades für unterschiedliche Pulszahlen beim Entzünden eines Edelstahlbauteils.

In einer besonderen Ausgestaltung erfolgt die spektrale Reflexionsmessung als Zwei-Wellenlängen-Reflexionsmessung, bei der die Reflexionsgrade bei der Wellenlänge des verwendeten Bearbeitungslasers und bei der Wellenlänge eines Sondenlasers, z. B. eines HeNe-Lasers gemessen und ins Verhältnis gesetzt werden. Es können hierfür auch zwei verschiedene Sondenlaser eingesetzt werden.

Die ortsaufgelöste Reflexionsmessung ermöglicht Rückschlüsse auf den Bearbeitungsgrad an unterschiedlichen Stellen der Werkstückoberfläche. Insbesondere ist hiermit bei Bearbeitung mit kontinuierlichem Vorschub ein direkter Vergleich von Oberflächenbereichen möglich, bei denen die Bearbeitung unterschiedlich weit fortgeschritten ist. Bei den verschiedenen Oberflächen-

behandlungsverfahren können z. B. der Abtrag von Deckschichten oder -partikeln, oder das Anschmelzen der Oberfläche ausgewertet werden.

Die Kombination der einzelnen Meßmethoden wie beispielsweise winkelaufgelöste und spektrale Reflexionsmessung ist ebenfalls möglich. Bei allen Meßmethoden kann insbesondere der Bearbeitungszustand in Abhängigkeit der Strahlparameter z. B. der Pulsenergie der Energiedichte oder der Anzahl eingeschalteter Laserpulse ausgewertet werden, um die Prozeßführung bewerten und regeln zu können.

Zur Bestimmung der Stellgrößen werden die On-Line erfaßten Meßwerte der Laserstrahlparameter und des Bearbeitungszustandes der zentralen Steuereinheit 6 zugeführt. In dieser zentralen Steuereinheit 6 werden die Meßwerte von einem Prozeßrechner mit vorgegebenen Sollwerten verglichen, die experimentell ermittelt und/oder durch Berechnung bestimmt werden. Bei diesem Istwert-Sollwert-Vergleich wird insbesondere die Abhängigkeit der Prozeßkenngrößen von den Laserstrahlparametern berücksichtigt. Unter Beachtung dieser Abhängigkeit werden die Stellgrößen für den Bearbeitungsprozeß von der zentralen Steuereinheit 6 berechnet.

Als Stellgrößen stehen zur Verfügung:

- Pulsenergie
- Form und Größe des Strahlquerschnitts auf dem Bauteil
- Strahlverteilung
- Energiedichte
- Fokuslage
- Pulswiederholungsrate
- Zusammensetzung und Durchflußmenge von Prozeßgas
- Bauteilvorschub bzw. Optikvorschub.

Die Regelung dieser Stellgrößen erfolgt mit Hilfe der zentralen Steuereinheit 6. So kann beispielsweise die Pulsenergie extern durch variable optische Abschwächer oder laserintern gesteuert werden.

Im allgemeinen erfolgt die Bearbeitung durch Bewegung des Werkstücks bei feststehender Optik. Eine Bearbeitung eines stationären oder nur in einer Richtung zu verfahrenden Werkstücks mit bewegter Optik ist ebenfalls möglich. Ferner kann die Verwendung eines Lichtleiters zur Übertragung der Strahlung des Bearbeitungslasers und der für den Prozeß charakteristischen Reflexions- und Materialdampfplasmasignale von Vorteil sein.

Die Regelung der Prozeßparameter wie Laserstrahlparameter, Parameter der Gasführung und Bauteilbewegung (Positionierung, Vorschubgeschwindigkeit) ermöglicht die Sicherstellung der Bearbeitungsqualität auch bei ausgedehnten Bearbeitungsflächen und/oder bei variierender Oberflächenbeschaffenheit des Ausgangsmaterials im Bearbeitungsbereich.

Ohne Einschränkung des allgemeinen Erfindungsdankens können die Merkmale der vorliegenden Erfindung entsprechend den jeweiligen Bearbeitungsbedingungen in geeigneter Weise einzeln oder in beliebiger Kombination anzuwenden sein. Insbesondere durch eine geeignete Kombination der erfindungswesentlichen Merkmale kann das Ziel der Bearbeitung sichergestellt werden.

1 Laserstrahlquelle  
 2 Laserpulse  
 3 Werkstück  
 4 Handhabungssystem  
 5 Detektorsystem  
 6 Steuereinheit  
 7 1. Strahlteiler  
 8 2. Strahlteiler  
 9 Linse  
 10 1. Photodiode  
 11 Lochblende  
 12 2. Photodiode  
 13 Zwischenschaltung

5

10

20

30

35

45

50

55

65

lenlänge des Bearbeitungslasers und bei der Wellenlänge des oder der Sondenlaser(s) zueinander ins Verhältnis gesetzt werden.

7. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 6, dadurch gekennzeichnet, daß eine EDV-gestützte Steuereinheit benutzt wird.

8. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 7, dadurch gekennzeichnet, daß die Bearbeitungsparameter während der Bearbeitung optimiert werden.

Hierzu 4 Seite(n) Zeichnungen

Patentansprüche

15

1. Verfahren zur Prozeßkontrolle und -regelung bei der Oberflächenbearbeitung von Werkstücken mit gepulster Laserstrahlung gekennzeichnet durch folgende Merkmale:

- Erfassung der für die jeweilige Bearbeitung relevanten Prozeßparameter
- Erfassung der von der Bearbeitungsstelle reflektierten Laserstrahlung und/oder der vom Materialdampfplasma an der Bearbeitungsstelle emittierten Strahlung
- Analyse des Bearbeitungszustandes durch Auswertung der erfaßten Prozeßsignale in Kombination mit den Laserstrahlparametern in einer Steuereinheit durch Vergleich der Istwerte mit vorgebbaren Sollwerten und
- Regelung der zur Anpassung der Istwerte an die Sollwerte erforderlichen Laserstrahlparameter und/oder der Position des Werkstücks mittels eines geeigneten Handhabungssystems und/oder der Zufuhr von Prozeßgas unter Einsatz der Steuereinheit.

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die reflektierte Laserstrahlung ortsaufgelöst und/oder winkelaufgelöst und/oder spektral aufgelöst erfaßt wird.

3. Verfahren nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß zur winkelaufgelösten Reflexionsmessung wenigstens ein Sondenlaser vorgesehen ist und daß zusätzlich zur oder anstelle der reflektierten Laserstrahlung des Bearbeitungslasers die von der Oberfläche des Werkstücks reflektierte Strahlung des oder der Sondenlaser(s) erfaßt wird.

4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, daß die vom Materialdampfplasma der Bearbeitungsstelle emittierte Strahlung spektral zerlegt wird (Plasmaemissionspektroskopie).

5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, daß die Erfassung und Auswertung der Meßwerte sowie die Regelung der Laserstrahlparameter und/oder des Handhabungssystems innerhalb eines Laserpulses oder zwischen aufeinanderfolgenden Laserpulsen erfolgen.

6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, daß zusätzlich wenigstens ein Sondenlaser mit einer von der Wellenlänge des Bearbeitungslasers verschiedenen Wellenlänge vorgesehen ist, daß die Laserstrahlung des oder der Sondenlaser(s) auf den Bearbeitungsbereich geführt wird, daß die von der Bearbeitungsstelle reflektierte Strahlung des oder der Sondenlaser(s) erfaßt wird, und daß die Reflexionsgrade bei der Wel-

**- Leerseite -**

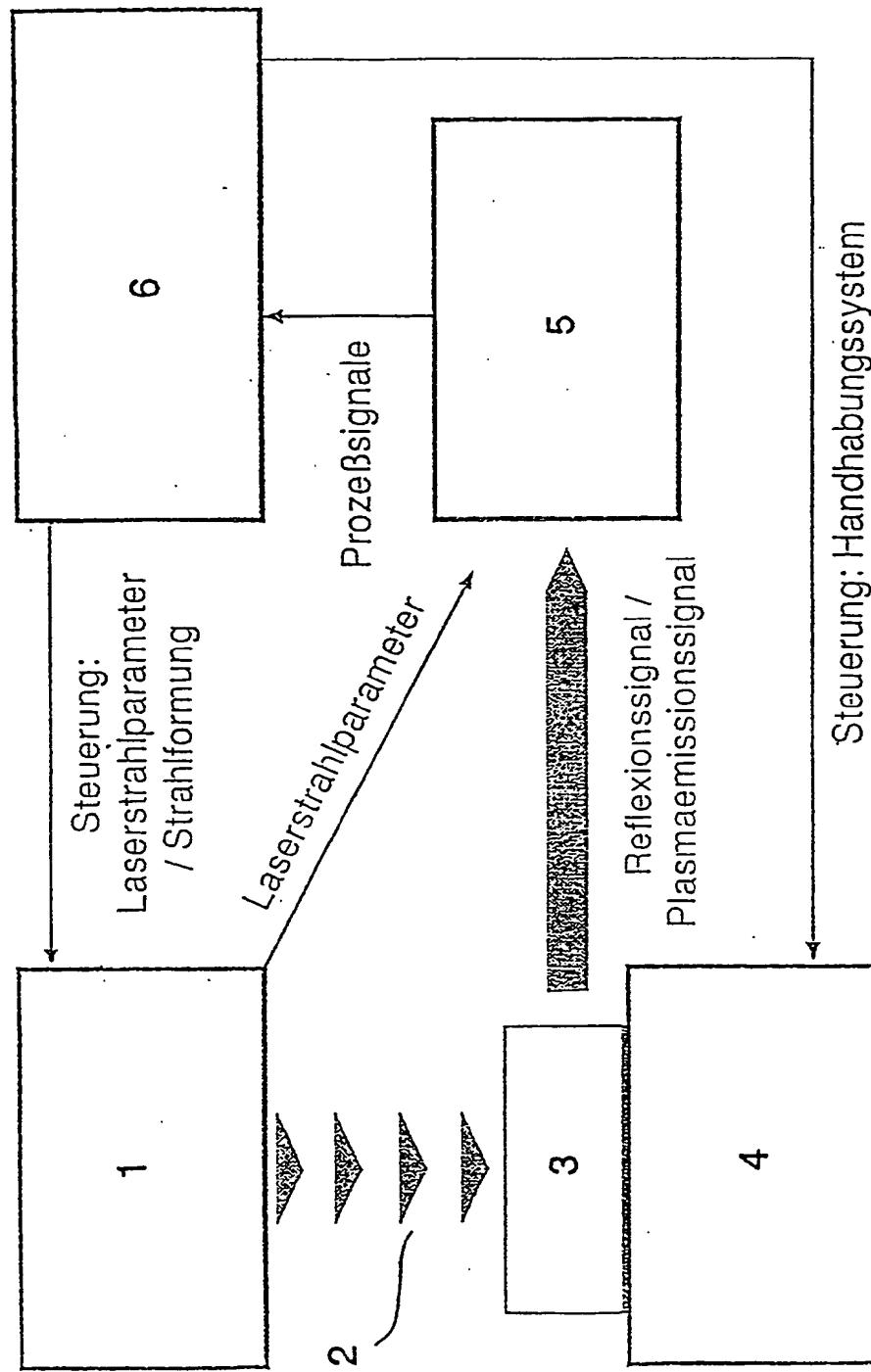


Fig. 1

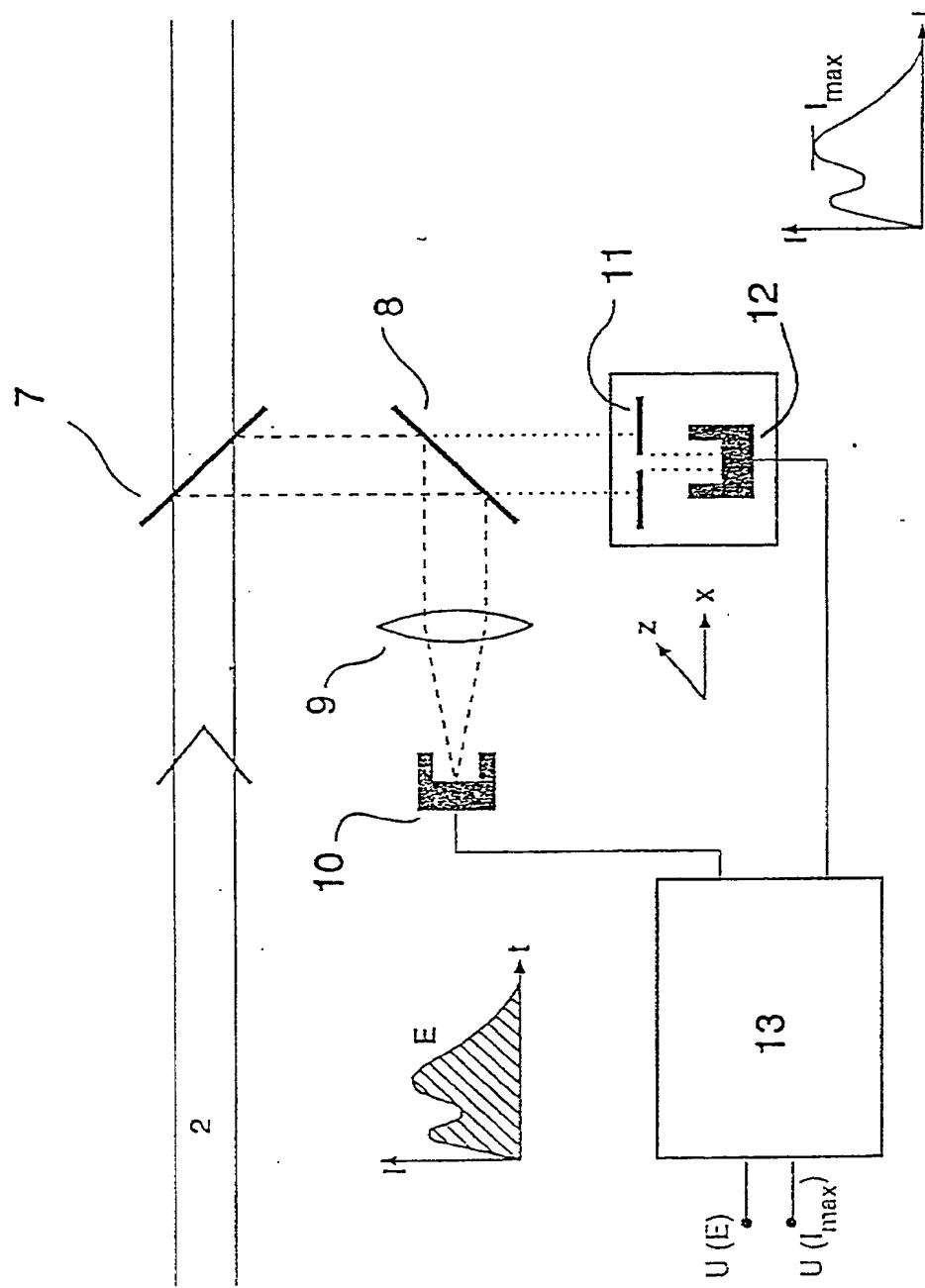
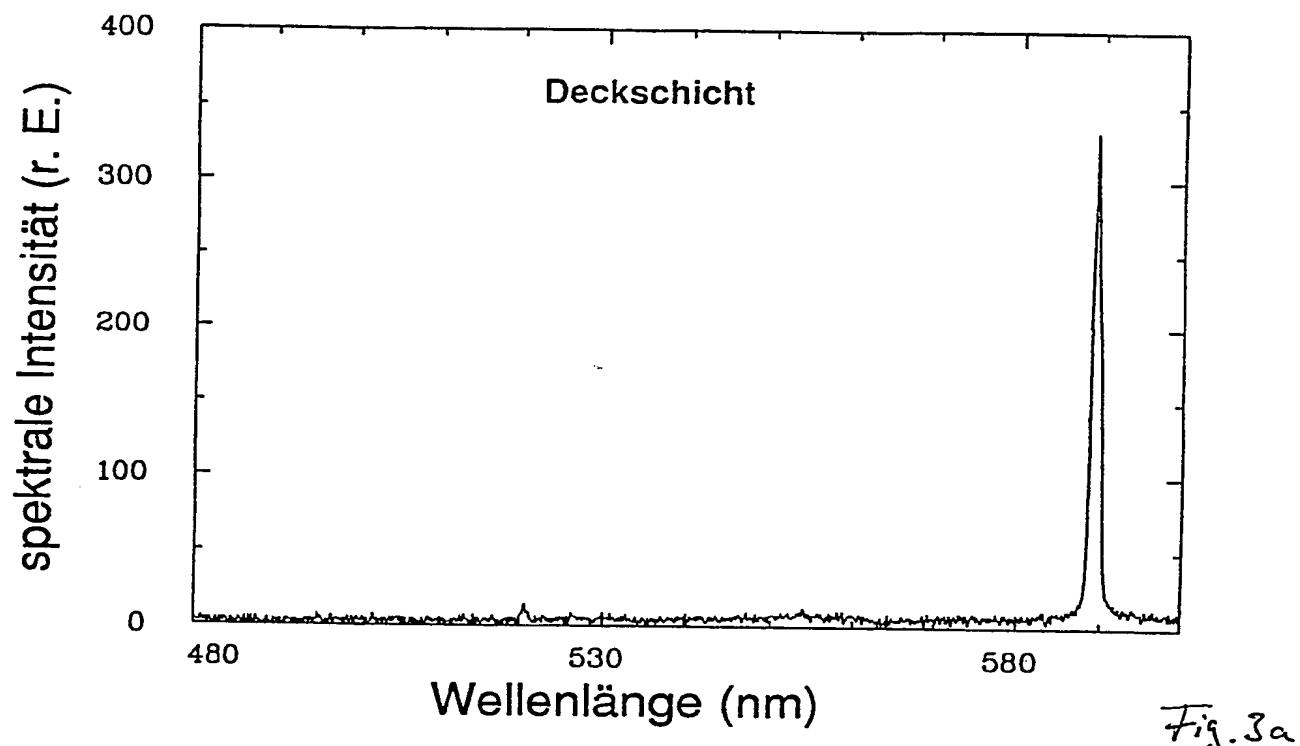
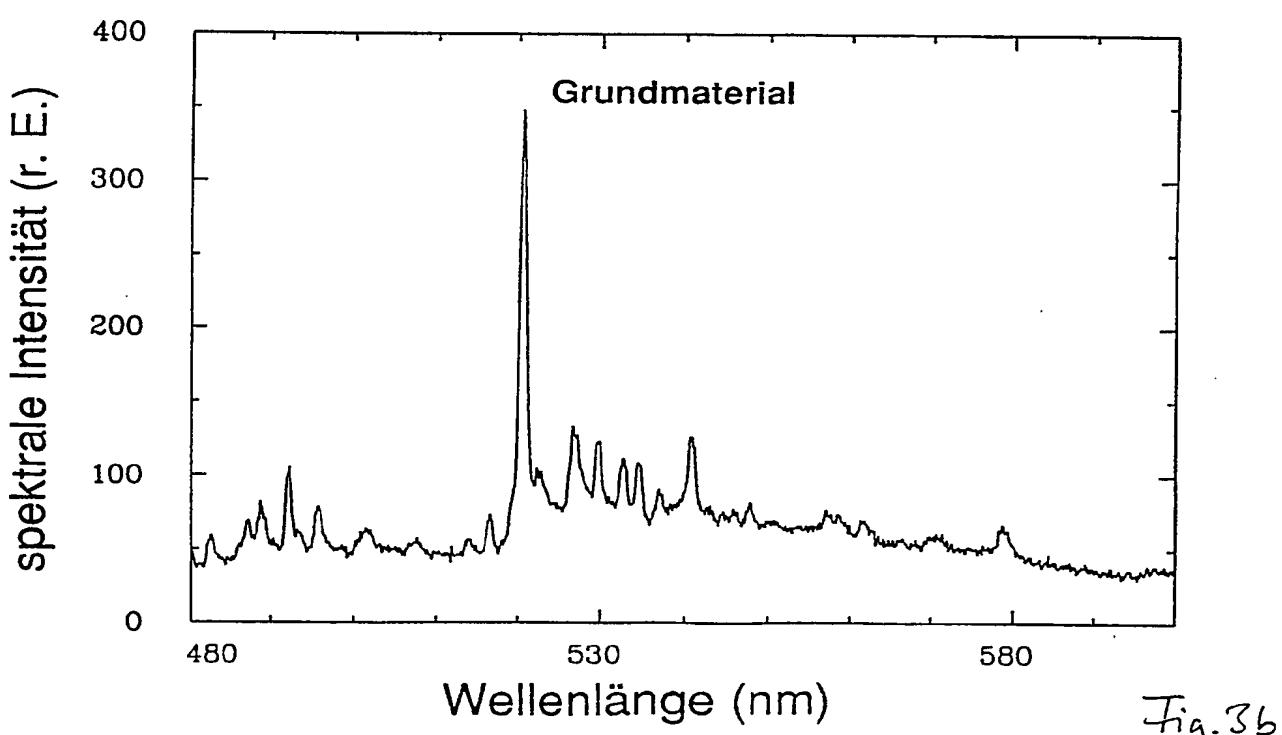


Fig. 2

Fig. 3aFig. 3b

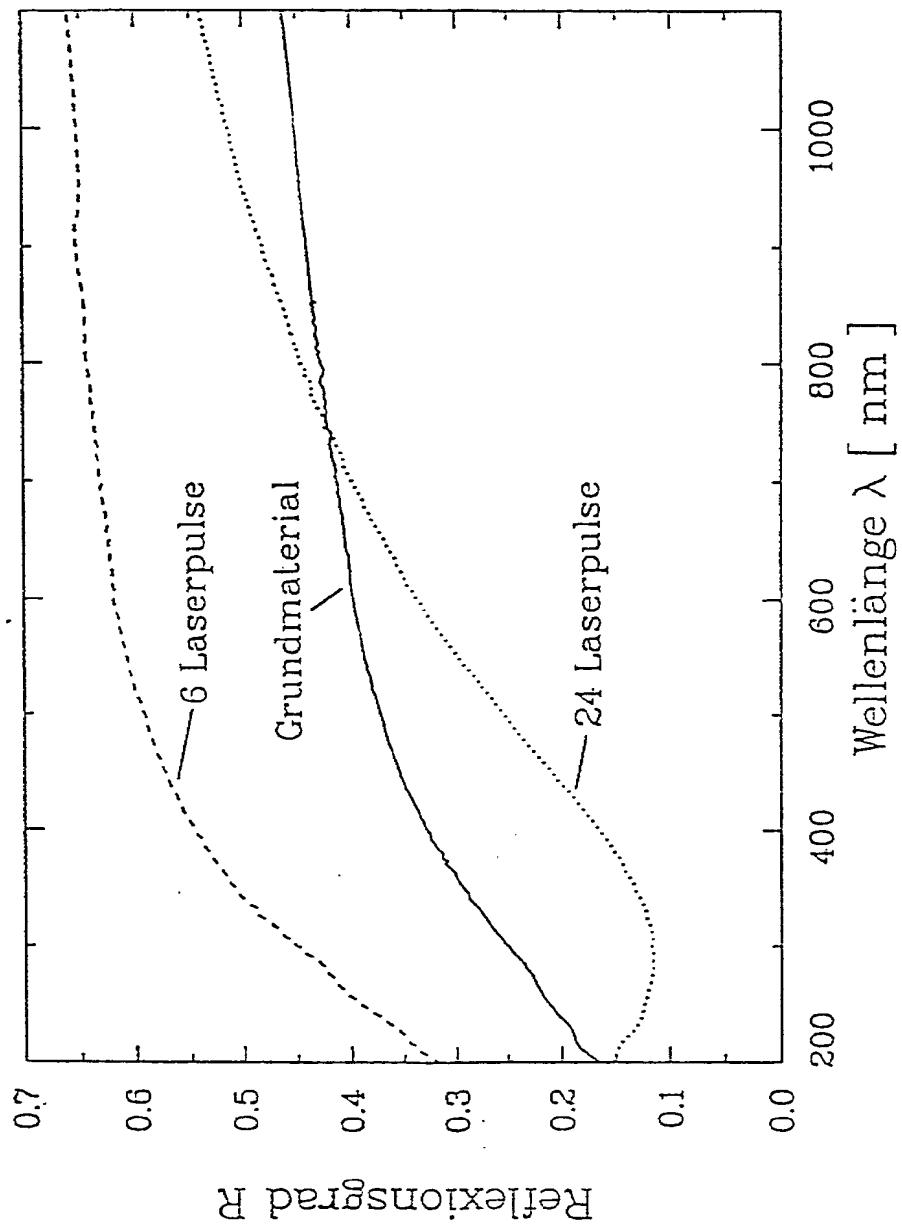


Fig. 4